

# 수직형 지중열교환기 열전도도 측정기술에 관한 연구

김 지 영, 이 의 준<sup>†</sup>, 장 기 창, 강 은 철

한국에너지기술연구원 지열에너지연구센터

## A Study on the Measurement of Thermal conductivity of Vertical Borehole heat Exchanger

Ji-Young Kim, Euy-Joon Lee<sup>†</sup>, Ki-Chang chang and Eun-Chul kang

Unutilized and Geothermal Energy Research Center, Korea Institute of Energy Research(KIER), Yoosung P.O Box 103, Daejon 305-600, Korea

**ABSTRACT:** The heat exchange between the Borehole Heat Exchanger(BHE) and the surrounding ground depends directly on ground thermal conductivity  $k$  at the certain site. The  $k$  is thus a key parameter in designing BHE and coupled geothermal heat pump systems. Currently, although a thermal hydraulic response test(TRT) is mostly used in practice, the thermal hydraulic TRT needs additional power and is generally time-consuming. A new, simple wireless P/T probe for a hi-speed  $k$  determination was introduced in this paper. This technique using a wireless P/T probe is less time-consuming and requires no external source of energy for measurement and predicts local thermal properties by measuring soil temperatures along the depth. Measured temperature data along the depth was analyzed. In order to verify the new technique for the determination of ground thermal conductivity, ground thermal conductivity  $k$  that calculated from the measured temperature data using a wireless P/T probe was compared with one obtained from conventional hydraulic TRT. When comparing the average  $k$  of two methods, the relative error was approximately 10%. As a result, the electronic TRT can replace the conventional hydraulic TRT method after carrying out the additional research on a lot of sites.

**Key words:** Wireless P/T probe(무선 압력/온도 프로브), Borehole heat Exchanger(보어홀 열교환기), Ground thermal conductivity(지중열전도도), TRT(열응답 실험), Local terrestrial heat flow (국부 지열류량)

### 기 호 설 명

$Q$  : 열전달율 [W]

$L$  : 보어홀 길이 [m]

$a$  : 열확산율 [ $m^2/s$ ]

$a$  : 열확산율 [ $m^2/s$ ]

$T_f$  : 유체평균온도 [ $^{\circ}C$ ]

$t$  : 시간 [h]

$T$  : 온도 [ $^{\circ}C$ ]

$k$  : 열전도율 [W/mK]

$x$  : 깊이 [m]

$Q_{loc}$  : 국부 지열류량 [ $W/m^2$ ]

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-42-860-3514; fax: +82-42-860-3739

E-mail address: ejlee@kier.re.kr

## 하점자

$u$  : 깊이

$i$  :  $u$  깊이에서  $i$  만큼의 깊이

### 1. 서론

지열에너지는 지하 수 km 깊이 이하의 지열을 이용하는 심부지열 자원과 지표면 일사량의 영향으로 일정 깊이 이상이 되면 점차 안정적이고 일정한 온도를 유지하는 천부지열 자원으로 분류된다. 최근 우리나라인 경우 신재생에너지원으로써 지열에너지에 대한 많은 관심이 되고 있으며 대체로 지중 깊이 50m-200m의 약 15°C 내외의 일정한 온도를 가지고 있는 천부지열을 열원으로 이용하는 히트펌프(GSHP, Ground Source Heat Pump) 기술이 빠르게 보급 되고 있다. 지열히트펌프 시스템은 다른 열원기기에 비해 많은 에너지를 절약 할 수 있는 시스템으로써 이러한 지열히트펌프시스템은 건물에 냉·난방, 온수 농작물 건조, 농업용 원예온실시설 등 공간 냉·난방에 다양하게 이용 가능한 시스템이다.

지열히트펌프시스템은 크게 지중열교환기, 히트펌프, 부하기기로 구분되어지며 시스템을 설계하고 시공하기 위해서는 무엇보다도 실제 적용 예정 현장에서의 설치 환경 및 운전 조건이 지열히트펌프 시스템의 성능에 큰 영향을 미친다. 특히 지반과 지중 열교환기의 열교환율은 히트펌프의 열원 및 열침으로써 매우 중요한 요소이며 이 열교환율은 토양, 암반 특성 및 지하수 접촉여부 등에 의해 영향을 받기 때문에 이러한 지열히트펌프 시스템의 효율적인 설계와 적용을 위해서는 무엇보다도 시스템 설계시 지중 열교환유효도 측정(Thermal Response Test) 선행되어야 한다.

지중 열교환유효도는 지중열전도도로도 표현되고 있으며, 지중열전도도를 측정하고 분석하는 것은 지열히트펌프 시스템의 설계 및 지중열교환기 설치 용량을 결정짓는 중요한 변수로 작용된다. 현재 이러한 중요성에 의해 지열시스템 시공 초기 지중열전도도의 측정은 의무화 되어 있으며 이러한 지중열전도도의 측정 기술에 대한 다양한 연구 또한 진행되어지고 있다. 현재 국내에서는 열유체 방식의 지중열전도도 측정 기술이 많이 보급되어 있으며 Fig. 1에서와 같이 지중열교환

기 내에 일정한 에너지를 가진 유체를 흘려보냄으로써 지반과 고온의 유체 사이에 열교환후 이때의 보어홀 열교환기 입·출구 유체 온도차를 이용하여 측정하는 방법으로 지중 전체를 하나의 시스템으로 보는 거시적 관점에서 이루어진 기술이다. 열유체 방식은 보어홀 전체의 평균 온도와 평균 열전도도를 얻을 수 있으며 지중 열교환기가 설치된 현지에서의 통합된 지중 열전도도를 측정할 수 있어 열교환기 설치 길이 설계가 용의하다는 장점이 있다. 그러나 열전도도 측정시 보어홀 열교환기에 충분한 열을 공급하기 위해 높은 전력이 요구되며 측정시간 또한 48시간 이상 소요된다. 그러나 실질적으로 지중은 대부분이 깊이에 따라 다양한 열적 특성을 가지는 비균질 토양층으로 이루어졌고, 같은 토양층일지라도 토양의 수분함유량, 공극율, 기후상태 등의 변화에 따라 토양의 열적 특성이 달라진다. 기존 열유체 방식인 경우 이러한 부분에 대한 자세한 정보를 얻을 수 없다. 이에 본 연구에서는 깊이별 토양층에 따른 지중 온도 특성 측정이 가능한 무선 전자식 측정 장치인 무선 P/T 프로브를 이용하여 KIER 원내 시추되어진 보어홀 열교환기에 적용해보았으며 열유체 방식 또한 적용하여 지중열전도 측정 방식에 대한 상호 비교 분석을 해보았다.

### 2. 열유체 방식 지중열전도 측정

열유체 방식 중열전도도 측정은 Fig. 1과 같이 지중열교환기를 설치하고자 하는 위치에 시험용

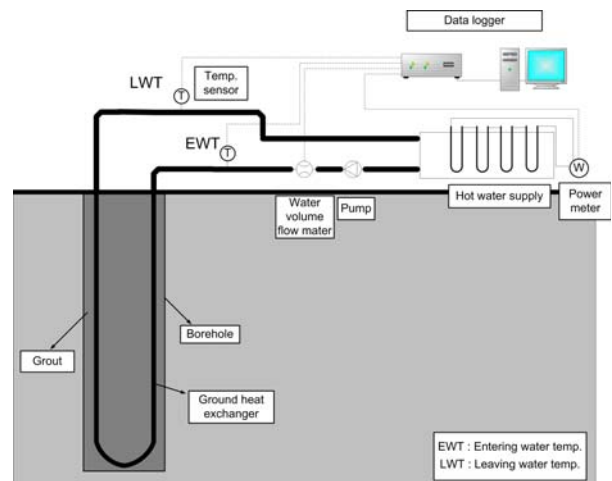


Fig. 1 Conventional thermal hydraulic TRT

보어홀을 먼저 설치하고 여기에 온수(혹은 냉수)를 순환시키며 순환수의 입·출구 온도를 일정한 시간 간격(10분 또는 그 이하)으로 측정하는 것이다. 측정 방법은 시험시간이 48시간 이상 계속되어야 하며, 온수 순환을 통하여 지중으로 전달되는 열량은 대략 보어홀 단위 길이당 50~80 W/m 수준으로 전달되어야 한다. 이 정도의 전열량은 실제 지열원 열펌프 가동시의 최대부하 범위에 속하는 것이며 보통 보어홀 50~70m당 1RT 정도가 된다. 시험 초기에는 먼저 가열장치를 작동하지 않고 물만 순환시켜 초기 지중온도를 측정 한 후에 가열장치를 작동시키며 온수 히터의 용량을 제어하여 지중으로 전달되는 열량은 가능하면 일정하게 유지되어야 한다. 온수 유량은 온수의 입/출구 온도차가 3.5~7℃ 정도가 되도록 권장되고 있다. 이 온도차는 실제 현장에서 가동될 때의 온도차를 기준으로 정한 범위이다.

지중 열전도도  $k$ 값은 식(1)에 의해서 구할 수 있으며 여기서,  $Q$ 는 토양으로 전달되는 열전달율,  $L$ 은 보어홀의 길이이며 따라서  $Q/L$ 은 보어홀 단위 길이 당 열전달율,  $a$ 는 토양의 열확산율,  $k$ 는 토양의 열전도도를 나타낸다.

$$k = \frac{Q/L}{4\pi a} \quad (1)$$

열응답시험을 통하여 시간에 따른 보어홀 유체 온도를 측정하고 그 결과를  $Tf - \ln t$ 의 좌표위에 나타낸다.  $Tf$ 는 보어홀 내부를 흐르는 유체의 평균온도,  $t$ 는 시간을 나타내며  $Tf - \ln t$  관계로부터 선형 피팅을 통해 기울기  $a$ 를 구한 후 식(1)으로부터  $k$ 를 결정하게 된다.

### 3. 무선 P/T 프로브 방식 지중열전도 측정

본 연구에 새로이 적용되어진 측정 장치는 스위스 G사에서 제작한 무선 전자식 P/T 측정 장치로 기존의 열유체 장치에 비해 매우 작고 가벼우며, 사용이 간편하다. Fig. 2는 장치의 실제 사진 및 회로도를 나타낸 것으로 케이스를 포함하여 길이는 약 23.5cm이며 수압 100bar까지 견딜 수 있는 금속재질로 만들어졌다. U 튜브내에 깊이 측정을 위한 압력센서 및 온도센서, 데이터 산출 및 저장을 위한 소형-데이터로거, 마이크로

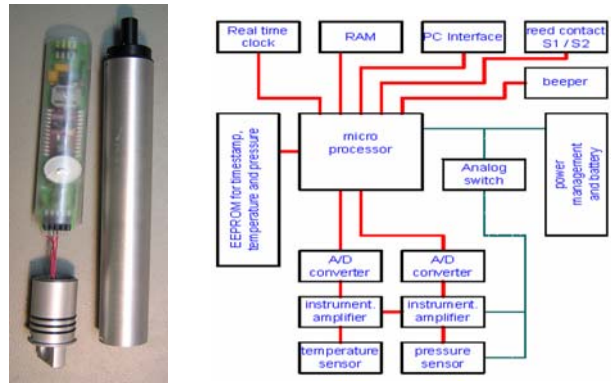


Fig. 2 Wireless P/T probe

프로세서, 메모리로 구성되어 있으며 사용방법은 Fig. 3과 같이 보어홀내 열교환기에 직접 투하하며 회수시에는 펌프를 이용하여 역방향의 유체를 유동시켜 회수한다. 이렇게 투하된 무선 P/T 프로브는 3.5초 간격으로 온도와 압력을 측정하여 깊이별 지중 온도를 얻어낸다. 무선프로브가 지중열교환기 바닥면까지 0.1m/s의 속도로 내려간다고 가정할시 300m의 경우 1시간 이내의 측정 시간을 갖는다. 이는 기존의 열유체를 이용한 지중 열전도도 측정 방식에 비해 약 47시간을 절약할 수 있다.

무선 전자식 장치를 통해 얻어진 깊이별 온도 데이터를 이용해 지중 열전도도를 깊이별로 산출할 수 있다. 특정 깊이( $x = x_u$ )에서 측정된  $T_u$  온도와  $i$  만큼의 거리에 있는 깊이( $x = x_i$ )에서 측정되어진 온도  $T_i$  에서의 지중 온도구배는 식(2)

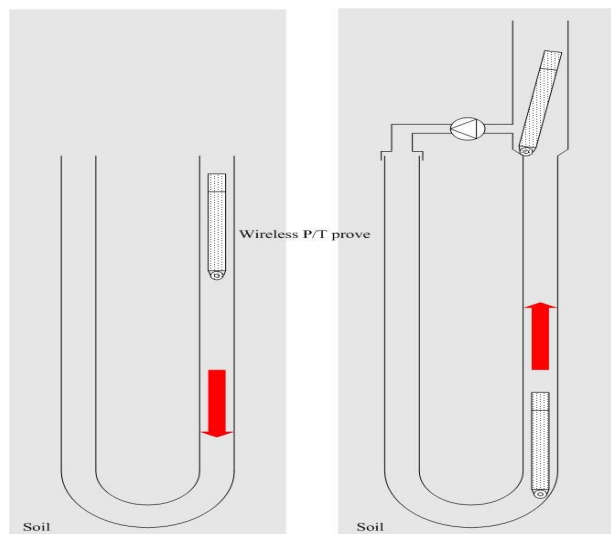


Fig. 3 Measurement method of the wireless P/T probe

과 같다.

$$\nabla T_i = \frac{T_u - T_i}{x_u - x_i} \quad (2)$$

결과적으로 식(3)과 같이 지중 온도구배와 국부 지열류량(local terrestrial heat flow value)에 의해 각 구간별 지중열전도도를 계산할 수 있다.

$$k_i = \frac{q_{loc}}{\nabla T_i} \quad (3)$$

이 식은 지중열교환기 주변의 어떠한 영향도 고려하지 않는다는 가정을 전제로 한다. 그러므로 열교환기 주변의 지열류량 변화에 대한 영향은 배제된다. 또한 국부 지열류량은 지역별 지열류량 조사 자료로부터 얻을 수 있으며 열류 데이터 분석 결과로써 대전 인근 지역 평균 지열류량인  $0.053\text{W/m}^2$ 의 값을 사용하였다.

#### 4. 지중열전도도 측정 결과

본 연구에서는 대전에 위치한 KIER 연구원내 깊이 150m의 지중열교환기에 대해 열유체 방식 및 무선 전자식 장비를 적용하였으며 지중열교환기에 대한 정보는 Table 1에서 나타내었다.

Fig. 4는 보어홀 입출구 및 평균 온도를 나타냈으며 이를 기초로 분석을 통해 Fig. 5와 같이

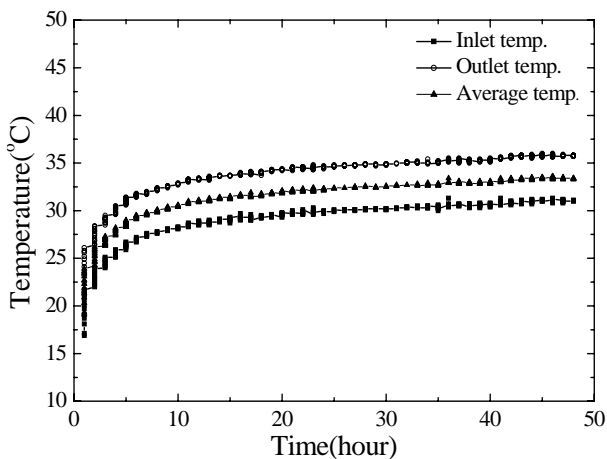


Fig. 4 Temperature curve for inlet, outlet, average, measured at the BHE head.

Table 1 Specifications of a borehole

A sort of heat exchanger	Single U-tube(vertical)
U-tube diameter	25mm
Borehole diameter	150mm
Borehole depth	150m
Borehole material	HDPE(High Density PolyEthylene)
Grouting material	20% bentonite

열확산률  $\alpha$ 를 구할 수 있었다. 총 측정된 시간은 48시간이며 Table 1에 정보와 측정된 소비전력, 기울기  $\alpha$ 를 식(1)을 대입하여 현지 지중열전도도를 산출하였으며 그 값은  $2.583 [\text{W/mK}]$ 임을 알 수 있었다.

Fig. 6은 무선 전자식 장비를 이용해 150m 깊이의 지중열교환기에 대해 2006년 7월에 실시한 보어홀의 깊이별 온도분포를 나타낸 것이다. 온도분포를 살펴보면 지표로부터 15m까지는 큰 온도변화가 일어나며 이는 태양 일사량 및 외기의 영향을 크게 받는 구역임을 알 수 있으며 약 25m 이후의 깊이에서는  $15.3 - 17.2^\circ\text{C}$  정도의 온도분포를 보이고 있다. 더욱 정밀한 해석을 위해 구간을 구분하여 깊이별 온도변화의 특성을 고려해보면 15m이후 65m까지도 외부에 영향으로 온도가 일정하게 유지 되는 것을 알 수 있으며 약 0-65m구간까지는 기후에 영향을 받는 구간임을 알 수 있다. 65m이상 구간에서는 깊이가 깊어짐에 따라 일정하게 온도가 상승하는 구간으로써 순수 지열 영향을 받는 구간임을 파악할 수 있

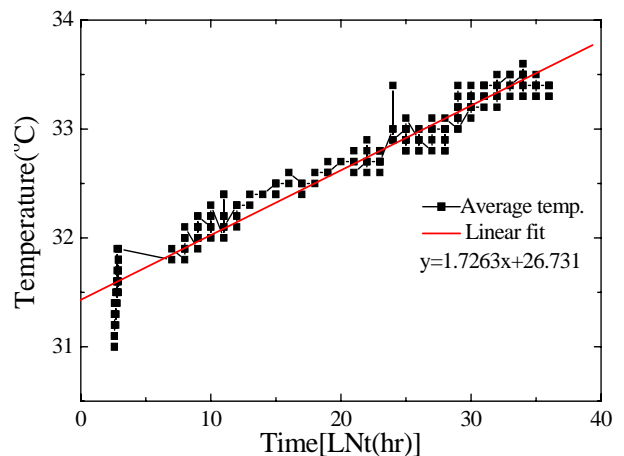


Fig. 5 Regression curve of mean fluid temperature.

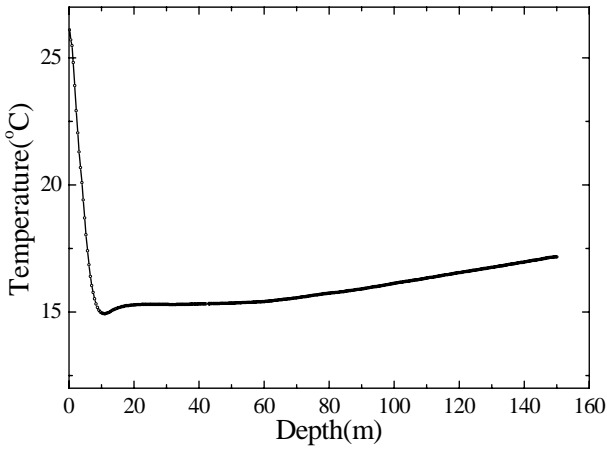


Fig. 6 Temperature variations over depth.

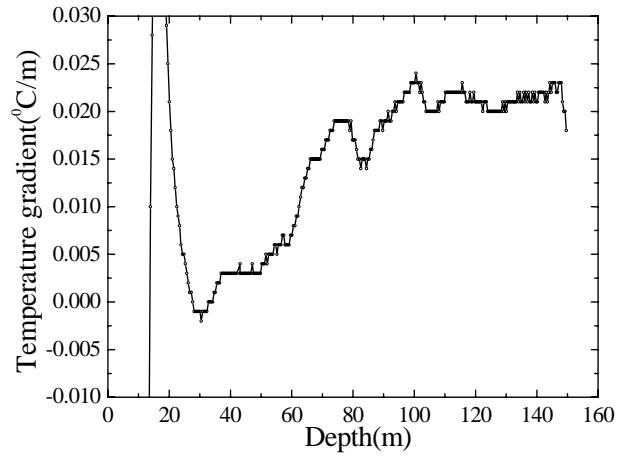


Fig. 8 Temperature gradient variations over depth.

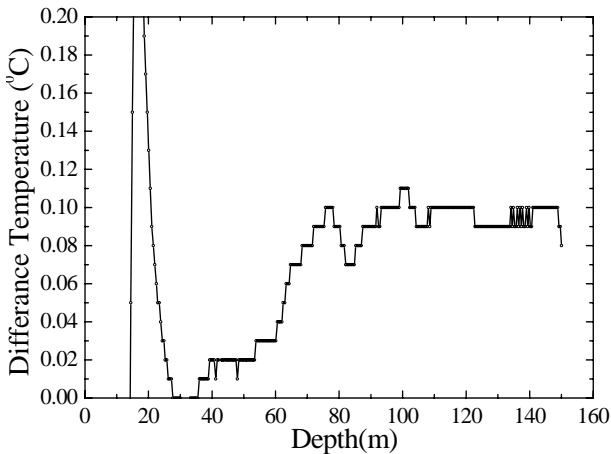


Fig. 7 Difference temperature variations over depth.

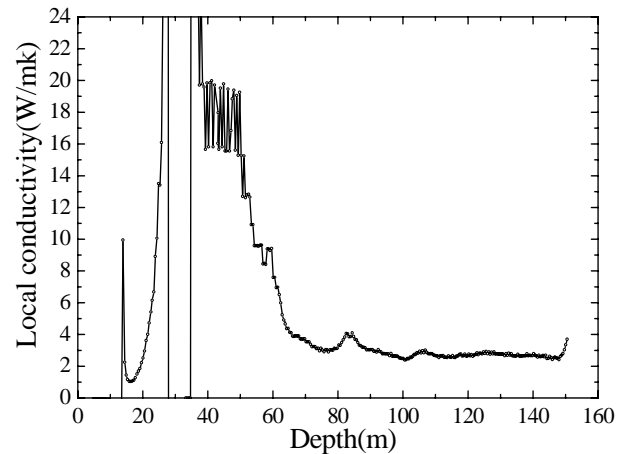


Fig. 9 Local conductivity variations over depth.

다.

Fig. 7은 무선 P/T 프로브의 떨어지는 속도 대비 10개 데이터 포인트를 간격으로 하여 각 구간 깊이별에 해당하는 온도차를 그래프에 나타내었으며 측정 간격은 약 2.3초이다. 0-65m 구간은 초기 온도차가 매우 크거나 온도차가 매우 미세하며 약 65m 이후부터 구간별 온도차가 일정해지는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 식 (2)에 의해 10개 데이터 포인트에 따른 온도구배 나타낸 것이다.

Fig. 9는 식(3) 의해 각 구간별 거리에 따른 깊이에 해당하는 열전도도를 계산한 그래프로써 평균 열전도도는 식(2)과 식(3)에 지중 온도구배가 양(+)일 경우에만 성립될 수 있다. 이는 Fig. 6, 7에서와 같이 기후에 영향을 받는 약 0-65m 구간에서는 외부 조건에 따른 너무 큰 값이나 온도구

배를 형성하지 못하는 구간이며 이곳에 열전도 계산 값은 전체 열전도에 무위한 값이며 이를 제외하고 순수지열에 의한 안정적인 온도분포를 갖는 구간에서 열적 특성을 고려하여 적용해야 할 것이다. 온도구배가 양(+)인 65-150m 구간에 평균적인 열전도도를 계산해보면 약 2.77W/mK의 값을 얻을 수 있었다. 부가적으로 보어홀에 실제 깊이를 알 수 있으며 무선 측정 장치의 낙하 속도를 관찰해보면 보어홀에 기울어진 정도 및 온도 분포를 통해 대수층에 여부 또한 파악 할 수 있다.

#### 4. 결론

열유체 방식 측정 장치 및 무선 전자식 측정

장치를 이용해 KIER내에 시추되어진 지중열교환기에 대해 열전도도 및 깊이별 온도분포 측정을 수행하였으며 이를 통해 기존에 열유체식 대비 지중열전도도 측정 장치 상호대비 우수성 및 보완점을 파악 할 수 있었다.

열유체 방식에 의해 구해진 열전도도는 2.583 [W/mK]이며 무선 전자식 장비에 의한 평균 열전도도 계산 결과 대비 상대오차가 약 10% 이내로 기존의 열유체식 방식을 대체할 수 있을 것으로 기대된다.

무선 전자식 측정 장치를 이용하여 보어홀의 깊이가 150m인 경우 깊이별 온도변화의 특성에 따라 크게 2구간으로 나눌 수 있으며 표면에서 깊이가 약 65m지점 이상부터 온도구배가 양(+)의 형태를 가지며 이를 통해 지중열전도도를 구할 수 있었다.

기존의 열유체 방식에 비해 신속하게 측정이 가능하며 깊이별 지중 온도특성 파악 및 짧은 시간 간격을 두고 반복 실험, 지중열교환기 깊이와 설치 기울기와 같은 설치 상태 파악 등과 같이 기존에 열유체 방식에 비해 유용한 이점을 가지고 있어 기존방식의 대체 및 보완을 할 수 있는 가능성을 파악 할 수 있었다. 그러나 현재 지역 지열유량에 대한 정확한 정보가 미흡하고 이를 실제 적용시 열전도도에 대한 정확성이 낮아 질 수 있으므로 지역지반 열특성에 관한 데이터 확보 및 정확성을 높이기 위한 연구 또한 함께 진행되어야 할 것이다.

## 참고 문헌

1. Lund, J.W. and Freeston, D.H. , 2001, "World-wide direct uses of geothermal energy", Geothermics, Vol 30, pp29-68.
2. <http://www.geowatt.ch>
3. Rohner, E., Rybach, R., and Scharli, U., 2005, "A New, Small, Wireless Instrument to Determine Ground Thermal Conductivity In-Situ for Borehole Heat Exchanger Design", World Geothermal Congress, Calculation Programs. ASHRAE Transactions. 108(1):3-17.
4. Hyoung Chan Kim, Saro Lee and Moo Young Song, 2004, "Geological Characteristics and Heat Flow Relationship in South Korea", Economic and environmental geology, Vol. 37, pp 391-400.
6. Krarti, M., Lopez-Alonzo, C., Claridge, D.E.,and Kreider, J. F., 1995, "Analytical Model to Predict Annual Soil Surface Temperature Variation," Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 117, pp91-99.
7. Yong Hwan Kim, Gun Hyuk Ko, Eun Chul Kang and Euy Joon Lee, 2007, "Wireless High Speep Electronic Geothermal Temperature Measurement Study" Proceedings of the SAREK 2007 Summer Annual Conference, pp 245-250.